

BIOAKTIVITAS NANOPARTIKEL ZnO HASIL GREEN SYNTHESIS BERBASIS EKSTRAK DAUN *Annona muricata* TERHADAP *Spodoptera frugiperda*

BIOACTIVITY OF GREEN-SYNTHEZIZED ZnO NANOPARTICLES BASED ON *Annona muricata* LEAF EXTRACT AGAINST *Spodoptera frugiperda*

Sigit Ardiansyah^{1*}, Nurma Pratiwi², Pebria Sisca³

¹Program Studi Hortikultura, Jurusan Budidaya Tanaman Pangan, Politeknik Negeri Lampung, Indonesia

²Program Studi Pengembangan Produk AgroIndustri, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Lampung, Indonesia

³Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Hortikultura, Jurusan Budidaya Tanaman Pangan, Politeknik Negeri Lampung, Indonesia

* Corresponding Author. E-mail address: sigitard@polinela.ac.id

PERKEMBANGAN ARTIKEL:

Diterima: 25-8-2026
Direvisi: 6-9-2026
Disetujui: 19-9-2026

KEYWORDS:

Annona muricata,
Antifeedant, Green
synthesis, *Spodoptera*
frugiperda, Zinc oxide
nanoparticles

KATA KUNCI:

Annona muricata,
Antifeedant, Green
synthesis, Nanopartikel
ZnO, *Spodoptera frugiperda*

ABSTRACT

The intensive use of chemical insecticides to control the invasive pest *Spodoptera frugiperda* has contributed to the development of insecticide resistance and environmental pollution, necessitating eco-friendly bio-insecticide alternatives. This study aimed to evaluate the contact toxicity, antifeedant activity, and repellent of green-synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) based on *Annona muricata* leaf extract against third-instar *S. frugiperda* larvae. The ZnO nanoparticles were synthesized by reacting zinc acetate dihydrate with *A. muricata* leaf extract at pH 11 and 70 °C. The bioactivity was evaluated through contact toxicity assays, antifeedant activity tests (no-choice test), and repellent assays (two-choice test). Physical characteristics of the nanoparticles were analyzed using a Particle Size Analyzer (PSA). The results demonstrated time-dependent toxicity, with the LC₅₀ value decreasing from 1721.60 ppm 24 hours after treatment (HAT) to 1064.28 ppm 72 hours after treatment (HAT). The highest antifeedant activity was achieved at a concentration of 1600 ppm with 84.83% (strong) at 24 HAT, while the maximum repellent rate of 60.00% was obtained at 1600 ppm after 24 hours. PSA characterization revealed a Z-average hydrodynamic size of 208.4 nm, a polydispersity index (PI) of 0.624, and a zeta potential of -30.1 mV. In conclusion, ZnO nanoparticles synthesized based *A. muricata* extract show high potential as bio-insecticidal agent for controlling *S. frugiperda* pest.

ABSTRAK

Penggunaan insektisida kimia yang intensif dalam mengendalikan hama invasif *Spodoptera frugiperda* telah berkontribusi terhadap perkembangan resistansi insektisida dan pencemaran lingkungan, sehingga diperlukan alternatif bioinsektisida yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi toksisitas, aktivitas antifeedant dan repelen nanopartikel seng oksida (ZnO) hasil green synthesis berbasis ekstrak daun *Annona muricata* terhadap larva *S. frugiperda* instar III. Nanopartikel ZnO disintesis mereaksikan zinc acetate dihydrate dan ekstrak daun *A. muricata* pada kondisi pH 11 dan suhu 70 °C. Bioaktivitas diuji melalui uji toksisitas kontak, aktivitas antifeedant (no-choice test), dan uji repelen (two-choice test). Karakteristik fisik nanopartikel dianalisis menggunakan Particle Size Analyzer (PSA). Hasil penelitian menunjukkan toksisitas nanopartikel bersifat time-dependent, dengan penurunan nilai LC₅₀ dari 1.721,60 ppm 24 jam setelah perlakuan (JSP) menjadi 1.064,28 ppm 72 jam setelah perlakuan (JSP). Aktivitas antifeedant tertinggi dicapai pada konsentrasi 1.600 ppm sebesar 84,83% (kuat) pada 24 JSP, sementara persentase repelen tertinggi sebesar 60,00% diperoleh pada konsentrasi 1.600 ppm setelah 24 jam. Hasil karakterisasi PSA menunjukkan nilai Z-average sebesar 208,4 nm, indeks polidispersitas (PI) 0,624, dan potensial zeta sebesar -30,1 mV. Nanopartikel ZnO berbasis ekstrak *A. muricata* berpotensi tinggi sebagai agen bioinsektisida dalam mengendalikan hama *S. Frugiperda*.

1. PENDAHULUAN

Spodoptera frugiperda (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) merupakan hama invasif dan polifag yang telah menjadi ancaman serius bagi produksi pertanian. Hama ini menyebabkan kerusakan pada berbagai tanaman inang termasuk jagung, sorgum, kedelai, serta tanaman hortikultura (Overton *et al.*, 2021). Pada tanaman jagung larva *S. frugiperda* dapat menyebabkan kerusakan pada daun, titik tumbuh, dan tongkol yang dapat menurunkan hasil jagung (Supartha *et al.*, 2021). Serangan dari larva ini mampu menyebabkan kehilangan hasil lebih dari 50% pada kondisi serangan tinggi (Sharma *et al.*, 2022). Hingga saat ini, pengendalian hama tersebut masih sangat bergantung pada insektisida kimia.

Penggunaan insektisida kimia secara intensif dan tidak terkontrol dapat menimbulkan berbagai permasalahan, seperti resistensi hama, resurgensi, pencemaran lingkungan, serta dampak negatif terhadap organisme non-target (Zelaya-molina *et al.*, 2022). Hama *S. frugiperda* kini telah mengalami penurunan sensitivitas terhadap berbagai bahan aktif insektisida kimia, sehingga efektivitas pengendalian menjadi semakin terbatas (Mavridis *et al.*, 2025). Kondisi ini mendorong perlunya pengembangan alternatif pengendalian hama yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan insektisida nabati dan nanoteknologi.

Insektisida nabati yang berasal dari tumbuhan mengandung senyawa bioaktif seperti alkaloid, flavonoid, acetogenin, dan terpenoid yang bersifat toksik terhadap serangga (Gajger & Dar, 2021). Tanaman *Annona muricata* merupakan salah satu sumber bahan insektisida nabati karena mengandung senyawa bioaktif alkaloid, flavonoid, tanin, terpenoid, kumarin, antrakuinon, glikosida, fenol, fitosterol, saponin (Ramadhan dan Firmansyah, 2023). Ekstrak *A. muricata* dilaporkan memiliki aktivitas insektisida terhadap berbagai hama, termasuk *S. frugiperda* (Ardiansyah dan Nuryanti, 2025). Ekstrak *A. muricata* mempengaruhi umur imago, kesuburan, dan daya tetas telur *S. frugiperda* (Pavana *et al.*, 2023). Namun, aplikasi ekstrak tumbuhan dalam insektisida nabati menghadapi kendala seperti stabilitas rendah, kelarutan terbatas, dan efektivitas yang kurang optimal di lapangan (Kumar *et al.*, 2025).

Perkembangan nanoteknologi membuka peluang baru dalam meningkatkan kinerja insektisida nabati. Nanopartikel zinc oxide (ZnO), dilaporkan memiliki aktivitas insektisida yang mampu menyebabkan gangguan fisiologis, kerusakan integumen, serta peningkatan mortalitas larva *S. frugiperda* (Pittarate *et al.*, 2021). Efektivitas nanopartikel berkaitan dengan ukuran partikel yang sangat kecil, luas permukaan yang mempengaruhi, serta kemampuan nanopartikel untuk berinteraksi langsung dengan sistem biologis serangga (Li *et al.*, 2025).

Metode sintesis nanopartikel ZnO merupakan faktor penting yang memengaruhi sifat dan keamanan produk yang dihasilkan. *Green synthesis* nanopartikel ZnO menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi dan penstabil dinilai lebih unggul dibandingkan metode sintesis kimia karena bersifat ramah lingkungan, ekonomis, dan tidak melibatkan bahan beracun. Selain itu, nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* dilaporkan memiliki stabilitas yang baik serta aktivitas biologis yang lebih tinggi akibat senyawa fitokimia yang terikat pada permukaannya (Bekele *et al.*, 2021).

Penelitian mengenai efektivitas nanopartikel ZnO terhadap *S. frugiperda* telah dilakukan (Pittarate *et al.*, 2021) (Ruiz-aguilar *et al.*, 2025), pada penelitian tersebut menggunakan Nanopartikel ZnO komersial sehingga aspek pemanfaatan sumber hayati dalam proses sintesis nanopartikel belum dieksplorasi. Meskipun *green synthesis* ZnO NPs menggunakan ekstrak tumbuhan telah banyak dikembangkan karena metabolit sekundernya dapat berperan sebagai agen pereduksi dan penstabil nanopartikel. Namun, pemanfaatan daun *A. muricata* sebagai sumber hayati dalam sintesis ZnO NPs untuk pengendalian *S. frugiperda* masih terbatas. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya kajian mengenai pemanfaatan ekstrak daun *A.*

muricata sebagai sumber hayati dalam sintesis nanopartikel ZnO dan evaluasi bioaktivitasnya terhadap *S. frugiperda*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi bioaktivitas nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *A. muricata* terhadap *S. frugiperda*, yang meliputi toksisitas kontak, aktivitas *antifeedant* dan repelen.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni sampai dengan Agustus tahun 2026 di Laboratorium Tanaman I dan Laboratorium Agroindustri, Politeknik Negeri Lampung.

2.2 Rearing Hama *S. frugiperda*

Rearing S. Frugiperda merujuk pada penelitian Ardiansyah dan Nuryanti (2025) dengan beberapa modifikasi. Larva *Spodoptera frugiperda* diperoleh dari tanaman jagung di Kebun Percobaan Politeknik Negeri Lampung dan dipelihara di Laboratorium Tanaman 1 pada suhu 28 ± 2 °C dan kelembapan relatif $60 \pm 5\%$. Larva instar I—II dipelihara dalam toples plastik berventilasi dan diberi pakan berupa daun jagung muda, yang diganti setiap 48 jam. Memasuki instar III, Larva dipindahkan dan dipelihara secara individu dalam wadah toples untuk mencegah terjadinya kanibalisme antarlara. Larva dipelihara hingga memasuki fase pupa. Pupa kemudian dipindahkan ke dalam kandang kasa berukuran $40 \times 40 \times 60$ cm untuk berkembang menjadi imago. Dalam kandang imago diberi 10% larutan madu yang diteteskan pada kapas sebagai sumber nutrisi. Telur yang dihasilkan dikumpulkan dan dipelihara hingga menetas untuk memperoleh generasi berikutnya. Larva instar III yang sehat dan aktif dari generasi hasil pemeliharaan digunakan sebagai serangga uji.

2.3 Pembuatan Ekstrak *Annona muricata*

Daun *Annona muricata* yang diperoleh dari kebun percobaan Politeknik Negeri Lampung. Daun yang digunakan merupakan daun yang telah berkembang sempurna, berwarna hijau tua, sehat, tidak mengalami kerusakan fisik, serta bebas dari serangan hama dan penyakit. Daun dipisahkan dari tangkai, kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringanginkan pada suhu ruang hingga tidak terdapat air pada permukaan daun. dikering anginkan lalu digiling menggunakan grinder hingga menjadi serbuk (Ardiansyah dan Nuryanti, 2025). Selanjutnya ekstraksi *A. muricata* menggunakan pelarut aquades rasio 1:10 pada suhu 60 °C selama 30 menit dan dilakukan penyaringan menggunakan kertas whatman No. 41 (Rehman et al., 2025).

2.4 Sintesis nanopartikel ZnO

Sintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode *green synthesis*. Sebanyak 25 mL ekstrak *A. muricata* ditambahkan tetes demi tetes pada larutan zinc acetate dihidrat konsentrasi 0,1 M sebanyak 100 mL disertai dengan pengadukan menggunakan magnetic stirrer. Selanjutnya larutan diatur keasamannya menjadi pH 11 menggunakan larutan NaOH 0,5 M dan diaduk pada kecepatan 750 rpm suhu 70°C selama 2 jam hingga terjadi perubahan warna kuning menjadi kuning keruh dan terbentuk endapan. Endapan yang diperoleh disentrifugasi kecepatan 10000 rpm selama 10 menit kemudian dipisahkan dan dicuci menggunakan aquades, dikeringkan menggunakan oven suhu 50 °C untuk memperoleh nanopartikel ZnO (Abdelbaky et al., 2023) (Rehman et al., 2025).

2.5 Uji Toksisitas

Uji toksisitas nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* dilakukan terhadap larva *S. frugiperda* instar III menggunakan metode kontak yang merujuk pada penelitian (Ardiansyah et al., 2024). Suspensi nanopartikel ZnO disiapkan pada beberapa konsentrasi berdasarkan hasil uji pendahuluan. Perlakuan kontrol menggunakan formulasi tanpa nanopartikel ZnO. Suspensi dari masing-masing perlakuan disemprotkan secara langsung pada tubuh larva sebanyak lima kali semprotan menggunakan sprayer, dengan jarak penyemprotan ± 20 cm untuk setiap perlakuan. Larva kemudian dipindahkan secara individual ke dalam wadah pemeliharaan yang telah diberi pakan segar. Setiap perlakuan terdiri atas 3 ulangan dengan 30 larva per ulangan. Mortalitas larva diamati pada 24, 48, dan 72 jam setelah perlakuan (JSP). Larva dinyatakan mati apabila tidak menunjukkan respons gerak setelah disentuh menggunakan kuas halus. Data mortalitas pada setiap waktu pengamatan dianalisis menggunakan analisis probit dengan aplikasi POLO-PC untuk menentukan nilai lethal concentration (LC_{50} dan LC_{95}) beserta interval kepercayaan 95%.

2.6 Aktivitas Antifeedant

Aktivitas *antifeedant* nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* terhadap larva *Spodoptera frugiperda* instar III diuji menggunakan metode *no-choice test*. Daun jagung segar dipotong dengan ukuran 3 x 3 cm kemudian ditimbang sebelum perlakuan. Daun perlakuan direndam dalam suspensi nanopartikel ZnO sesuai konsentrasi perlakuan 1.000, 1.200, 1.400, 1.600, dan 1.800 ppm selama 5 menit, sedangkan daun kontrol direndam dalam formulasi tanpa nanopartikel ZnO selama waktu yang sama. Setelah perendaman, daun ditiriskan dan dikering anginkan hingga tidak terdapat cairan bebas pada permukaannya lalu dimasukkan ke dalam toples uji yang berisi 10 larva *S. frugiperda* instar III pada setiap toples kemudian diamati setelah 24, 48, dan 72 jam setelah perlakuan. Persentase aktifitas *antifeedant* dihitung dengan persamaan (Nuryanti et al., 2026):

$$AF = \frac{(CI - TI)}{CI} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

AF = Persentase aktivitas *antifeedant* (%)

CI = rata-rata konsumsi terkoreksi pada kontrol (g)

TI = rata-rata konsumsi terkoreksi pada perlakuan (g)

Hasil perhitungan aktivitas *antifeedant* (AF) kemudian dikonversikan ke dalam kriteria kualitatif sebagai berikut (Afifah dan Widiyaningrum, 2022).

AF < 30% : Tidak ada efek *antifeedant*

50% > AF $\geq$ 30% : *Antifeedant* rendah

70% > AF $\geq$ 50% : *Antifeedant* sedang

AF $\geq$ 70% : *Antifeedant* kuat

2.7 Uji Aktivitas Repelen

Uji aktivitas repelen nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* terhadap larva *Spodoptera frugiperda* dilakukan menggunakan metode uji pilihan dua daun (*dual-choice leaf assay*) yang dimodifikasi dari (Ren dan Chong, 2023). Lima potongan daun jagung berukuran 3 x 3 cm yang telah diberi perlakuan nanopartikel ZnO pada konsentrasi 1000, 1200, 1400, 1600, dan 1800 ppm, sedangkan lima potongan daun jagung lainnya tanpa perlakuan

nanopartikel ZnO digunakan sebagai kontrol dan diberi akuades dengan volume yang sama seperti perlakuan. Potongan daun perlakuan dan kontrol ditempatkan pada sisi yang berlawanan dalam arena uji dengan jarak yang sama dari titik pelepasan larva. Untuk menghindari bias akibat posisi, penempatan daun perlakuan dan kontrol dilakukan secara acak pada setiap ulangan. Posisi perlakuan dan kontrol ditukar secara bergantian atau diacak antar ulangan sehingga masing-masing perlakuan memiliki peluang yang sama untuk ditempatkan pada sisi kiri maupun kanan arena uji. Setelah penempatan daun, sebanyak 10 larva *S. frugiperda* instar III yang sehat dan aktif dilepaskan pada bagian tengah arena uji. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali, jumlah larva yang berada pada daun perlakuan dan daun kontrol diamati dan dicatat setelah 3, 6 dan 24 jam. Persentase repelen (PR) dihitung menggunakan persamaan (Ainun *et al.*, 2025):

$$PR(\%) = \frac{(C-E)}{T} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

PR = Persentase repelen (%)

C = Jumlah serangga yang hinggap pada kontrol

E = Jumlah serangga yang hinggap pada perlakuan

T = Jumlah total serangga yang digunakan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Toksisitas Nanopartikel ZnO Hasil *Green Synthesis* Berbasis Ekstrak Daun *Annona muricata*

Nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* menunjukkan aktivitas toksik terhadap larva *Spodoptera frugiperda* instar III, dengan respons yang meningkat seiring bertambahnya waktu setelah perlakuan. Berdasarkan analisis probit, Nilai LC₅₀ nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* ekstrak daun *A. muricata* menurun seiring bertambahnya waktu pengamatan, dari 1721,60 ppm pada 24 jam setelah perlakuan (JSP) menjadi 1418,13 ppm pada 48 JSP dan 1064,28 ppm pada 72 JSP. Pola serupa terlihat pada LC₉₅, yang turun dari 4615,96 ppm 24 JSP menjadi 1826,65 ppm 72 JSP (Tabel 1).

Tabel 1. Toksisitas Nanopartikel ZnO berbasis *A. muricata*

Waktu Pengamatan (JSP)	a ^a ±GB	b ^b ±GB ^c	LC ^d ₅₀ (SK ^e 95%) (ppm)	LC ^d ₉₅ (SK ^e 95%) (ppm)
24	-12,43 ± 3,84	3,84 ± 1,22	1721,60 (1505,54 ± 2564,15)	4615,96 (2887,43 ± 33619,58)
48	-11,42 ± 3,70	3,62 ± 1,18	1418,13 (1219,49 ± 1718,93)	4032,40 (2621,54 ± 26862,41)
72	-21,22 ± 4,71	7,01 ± 1,51	1064,28 (888,35 ± 1169,65)	1826,65 (1612,87 ± 2401,76)

Keterangan: a^a = intersep garis regresi probit, b^b = kemiringan regresi probit, GB^c = galat baku, LC^d = *lethal concentration*, SK^e = selang kepercayaan

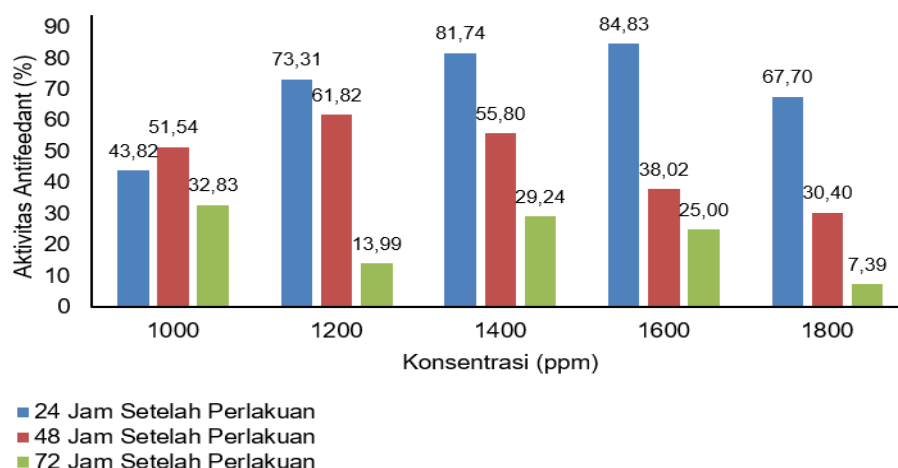
Penurunan nilai LC₅₀ dan LC₉₅ menunjukkan adanya respons toksik yang bergantung pada waktu (*time-dependent toxicity*), yaitu efektivitas nanopartikel meningkat dengan semakin lamanya paparan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kematian larva tidak hanya ditentukan oleh konsentrasi nanopartikel, tetapi juga oleh waktu interaksi antara nanopartikel ZnO dan tubuh

serangga. Hasil ini sejalan dengan (Pittarate et al., 2021), yang melaporkan bahwa paparan nanopartikel ZnO dapat mengganggu perkembangan *S. frugiperda* akibat stres oksidatif dan perubahan aktivitas enzim detoksifikasi.

Mekanisme peningkatan toksisitas selama periode pengamatan diduga berkaitan dengan kemampuan nanopartikel ZnO berinteraksi dengan permukaan tubuh maupun sistem pencernaan serangga. Toksisitas nanopartikel ZnO yang melibatkan pembentukan *reactive oxygen species* (ROS), pelepasan ion Zn^{2+} , serta gangguan terhadap fungsi dan integritas sel sehingga menyebabkan stres oksidatif dan gangguan fisiologis yang pada akhirnya berkontribusi terhadap kematian serangga (Kadir et al., 2025). Selain karakteristik nanopartikel ZnO, metabolit sekunder yang terdapat dalam ekstrak *A. muricata*, termasuk kelompok acetogenin, diduga berpotensi berkontribusi terhadap aktivitas biologis produk hasil green synthesis (Stupp et al., 2020). Senyawa fitokimia dalam ekstrak tanaman dapat berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil selama pembentukan nanopartikel, sehingga berpotensi memengaruhi karakteristik permukaan dan aktivitas biologis nanopartikel (Dube, 2026).

3.2 Aktivitas Antifeedant

Nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* menunjukkan aktivitas *antifeedant* terhadap larva *Spodoptera frugiperda* instar III. Aktivitas *antifeedant* nanopartikel ZnO berbasis ekstrak *Annona muricata* menunjukkan respons yang berbeda pada setiap waktu pengamatan (Gambar 1). Pada 24 JSP, aktivitas *antifeedant* meningkat dari 43,82% (rendah) pada konsentrasi 1000 ppm menjadi 73,31% dan 81,74% (kuat) masing-masing pada 1200 dan 1400 ppm, kemudian mencapai nilai tertinggi sebesar 84,83% (kuat) pada 1600 ppm. Namun, peningkatan konsentrasi menjadi 1800 ppm tidak diikuti peningkatan aktivitas, melainkan menurunkannya menjadi 67,70% (sedang). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi nanopartikel ZnO tidak selalu diikuti oleh peningkatan aktivitas *antifeedant* secara linear. Pada kondisi pengamatan ini, aktivitas *antifeedant* tertinggi secara deskriptif diperoleh pada konsentrasi 1600 ppm, sedangkan konsentrasi 1800 ppm menunjukkan penurunan aktivitas.



Gambar 1. Aktivitas *Antifeedant* Nanopartikel ZnO berbasis *A. muricata*

Pada 48 JSP, aktivitas *antifeedant* menunjukkan pola yang berbeda. Aktivitas tertinggi diperoleh pada konsentrasi 1200 ppm sebesar 61,82% (sedang), sedangkan konsentrasi 1400, 1000, 1600, dan 1800 ppm masing-masing menghasilkan aktivitas sebesar 55,80; 51,54; 38,02; dan 30,40% (rendah). Selanjutnya, pada 72 JSP, aktivitas *antifeedant* menurun pada seluruh

konsentrasi, dengan nilai tertinggi sebesar 32,83% (rendah) pada 1000 ppm dan terendah sebesar 7,39% (tidak ada *antifeedant*) pada 1800 ppm. Hal ini mengindikasikan bahwa efek *antifeedant* lebih kuat pada 24 JSP dan cenderung menurun pada periode pengamatan berikutnya.

Penurunan aktivitas *antifeedant* seiring bertambahnya waktu dapat berkaitan dengan berkurangnya keberadaan atau efektivitas senyawa bioaktif pada permukaan pakan, perubahan karakteristik bahan aktif selama periode pengamatan, serta adaptasi atau perubahan respons perilaku larva terhadap perlakuan (Jeon dan Hyung, 2025). Pada formulasi berbasis *green synthesis*, aktivitas biologis juga berpotensi merupakan hasil interaksi antara nanopartikel ZnO dan metabolit sekunder yang berasal dari ekstrak *A. muricata*. Nanopartikel dapat berperan sebagai pembawa atau meningkatkan kontak bahan aktif dengan permukaan pakan, sedangkan metabolit sekunder tanaman berpotensi memengaruhi penerimaan pakan melalui gangguan terhadap sistem sensorik dan perilaku makan serangga dengan menargetkan reseptor gustatori dan enzim detoksifikasi (Hatab et al., 2024). Oleh karena itu, efek *antifeedant* tidak dapat hanya berkaitan dengan peningkatan konsentrasi ZnO, tetapi kemungkinan merupakan hasil interaksi antara karakteristik nanopartikel, senyawa bioaktif ekstrak, konsentrasi, dan lama paparan.

Pada konsentrasi 1600 ppm menghasilkan aktivitas tertinggi pada 24 JSP (84,83%), tetapi bukan merupakan perlakuan paling efektif pada 48 dan 72 JSP. Hal ini menunjukkan adanya interaksi antara konsentrasi dan waktu pengamatan dalam menentukan respons *antifeedant*. Aktivitas yang tinggi pada periode awal kemudian menurun pada periode berikutnya yang mengindikasikan bahwa efek *antifeedant* bersifat kuat pada fase awal paparan kemudian melemah seiring waktu akibat degradasi senyawa, adaptasi sensorik, atau perubahan fisiologis. Konsentrasi tertinggi tidak menjamin efektivitas berkelanjutan jika durasi aktivitas biologis formulasi tidak dievaluasi secara sistematis. Oleh karena itu, efektivitas formulasi perlu dipertimbangkan tidak hanya berdasarkan konsentrasi tertinggi, tetapi juga berdasarkan durasi efektivitas biologisnya (Jia et al., 2026).

3.3 Aktivitas Repelen

Nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* berbasis ekstrak daun *Annona muricata* menunjukkan aktivitas repelen terhadap larva *Spodoptera frugiperda* pada seluruh konsentrasi yang diuji, meskipun respons bervariasi menurut konsentrasi dan waktu pengamatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berbasis *Annona muricata* memiliki aktivitas repelen terhadap *Spodoptera frugiperda* pada seluruh konsentrasi yang diuji, yaitu 1000, 1200, 1400, 1600, dan 1800 ppm (Tabel 2). Persentase repelensi pada pengamatan 3 jam berkisar antara 20,00–33,33%, meningkat menjadi 20,00–40,00% pada 6 jam, dan mencapai 20,00–60,00% setelah 24 jam. Aktivitas repelen tinggi diperoleh pada perlakuan 1600 ppm setelah 24 jam sebesar 60,00%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO berbasis ekstrak *A. muricata* mampu menghasilkan respons penghindaran pada *S. frugiperda*, meskipun respons yang dihasilkan tidak menunjukkan pola peningkatan yang linear terhadap konsentrasi. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh variasi respons perilaku larva terhadap senyawa aktif serta perbedaan volatilitas dan distribusi senyawa aktif pada permukaan perlakuan. Karakteristik permukaan daun setelah aplikasi nanopartikel juga dapat memengaruhi kontak dan persepsi larva terhadap bahan aktif, sehingga menghasilkan respons repelen yang bervariasi antar perlakuan dan waktu pengamatan.

Tabel 2. Aktivitas Repelen Nanopartikel ZnO berbasis *A.muricata*

Perlakuan (ppm)	Aktivitas Repelen (%) $\pm$ SD		
	3 Jam	6 Jam	24 Jam
1000	33,33 $\pm$ 11,55	40,00 $\pm$ 0,00	26,67 $\pm$ 11,55
1200	20,00 $\pm$ 0,00	26,67 $\pm$ 11,55	20,00 $\pm$ 0,00
1400	26,67 $\pm$ 11,55	20,00 $\pm$ 0,00	40,00 $\pm$ 0,00
1600	26,67 $\pm$ 11,55	20,00 $\pm$ 0,00	60,00 $\pm$ 0,00
1800	33,33 $\pm$ 11,55	40,00 $\pm$ 0,00	33,33 $\pm$ 11,55

Pada pengamatan awal 3 jam, repelen relatif rendah dan berada pada kisaran 20,00–33,33%. Perlakuan 1000 dan 1800 ppm menghasilkan nilai aktivitas repelen tinggi, yaitu masing-masing 33,33%, sedangkan konsentrasi 1200 ppm menghasilkan nilai terendah sebesar 20,00%. Setelah 6 jam, nilai repelen meningkat pada beberapa perlakuan, terutama 1000 dan 1800 ppm yang mencapai 40,00%. Peningkatan respons yang lebih jelas terlihat setelah 24 jam, terutama pada konsentrasi 1600 ppm yang mencapai 60,00%. Berdasarkan rata-rata waktu pengamatan, nilai repelen meningkat dari 28,00% pada 3 jam menjadi 29,33% pada 6 jam dan 36,00% pada 24 jam. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa lama paparan kemungkinan berperan terhadap munculnya respons penghindaran larva.

Peningkatan repelen seiring waktu dapat dikaitkan dengan semakin lamanya larva menerima rangsangan kimia dan fisik dari permukaan yang telah diberi perlakuan. Respons repelen pada serangga pada dasarnya merupakan respons perilaku yang melibatkan kemampuan serangga dalam mendeteksi rangsangan lingkungan melalui sistem kemoreseptor dan sensorik (Koerich *et al.*, 2025). Ketika suatu permukaan mengandung senyawa yang tidak sesuai atau tidak disukai, serangga dapat mengurangi kontak, menghentikan aktivitas makan, atau berpindah ke area lain (Gaire *et al.*, 2024). Oleh karena itu, nilai repelen yang lebih tinggi pada 24 jam dapat menunjukkan bahwa paparan yang lebih lama memberikan kesempatan lebih besar bagi komponen aktif dalam formulasi untuk memengaruhi perilaku larva.

Aktivitas tersebut diduga tidak terlepas dari keberadaan metabolit sekunder *A. muricata*. Tanaman *A. muricata* diketahui mengandung berbagai senyawa bioaktif, terutama kelompok acetogenin, yang telah banyak dikaitkan dengan aktivitas insektisidal pada serangga (Stupp *et al.*, 2020). Kajian mengenai *A. muricata* menunjukkan bahwa acetogenin merupakan salah satu kelompok metabolit yang berperan penting dalam aktivitas biologis tanaman tersebut. Aktivitas insektisidal *A. muricata* juga telah dilaporkan terhadap berbagai serangga, termasuk Lepidoptera (Durán-ruiz *et al.*, 2024). Beberapa senyawa acetogenin seperti cis-annonacin-10-one dan gigantetronenin dilaporkan mampu menyebabkan mortalitas sekaligus menurunkan aktivitas makan larva, sedangkan annonacin juga menunjukkan aktivitas toksik terhadap larva (González-lópez *et al.*, 2025). Hal ini memberikan dasar biologis bahwa keberadaan metabolit *A. muricata* dalam nanopartikel yang digunakan pada penelitian ini berpotensi berkontribusi terhadap respons penghindaran maupun gangguan aktivitas makan *S. frugiperda*.

Selain komponen fitokimia, karakteristik nanopartikel ZnO diduga turut berperan dalam aktivitas biologis formulasi. Ukuran partikel pada skala nano menghasilkan luas permukaan spesifik yang relatif besar sehingga meningkatkan peluang interaksi antara partikel dengan permukaan tubuh serangga maupun permukaan tanaman. Nanopartikel ZnO dapat berinteraksi dengan sistem biologis melalui beberapa mekanisme, termasuk kontak permukaan, pelepasan ion Zn^{2+} , dan pembentukan reactive oxygen species (ROS). Interaksi tersebut dapat menyebabkan perubahan pada membran sel dan keseimbangan oksidatif sehingga berpotensi mengganggu fungsi fisiologis serangga (Li *et al.*, 2023) (Raha dan Ahmaruzzaman, 2022).

Tingkat repelen juga dapat dipengaruhi oleh karakter biologis larva. Perilaku *S. frugiperda* tidak selalu seragam karena larva dapat menunjukkan perbedaan aktivitas eksplorasi, aktivitas

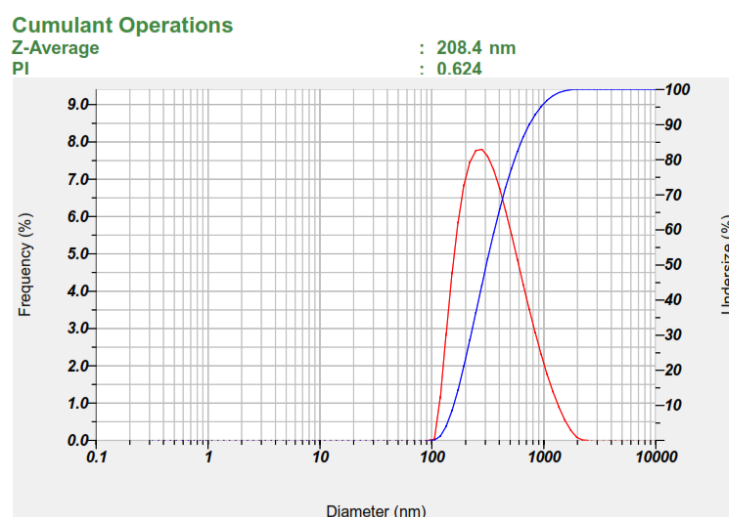
makan, dan kecenderungan berpindah dari satu lokasi ke lokasi lain (Li et al., 2023). Hasil uji repelen yang diperoleh pada penelitian ini diduga tidak hanya berasal dari ZnO sebagai material anorganik, tetapi juga dari metabolit aktif yang terdapat pada ekstrak tanaman yang digunakan dalam proses sintesis. Oleh karena itu, nanopartikel ZnO berbasis *A. muricata* memiliki prospek sebagai kandidat agen pengendalian *S. frugiperda*, tetapi penelitian lanjutan diperlukan untuk memisahkan kontribusi ZnO dan metabolit tanaman serta memastikan mekanisme repelen yang terjadi.

3.4 Karakteristik Nanopartikel ZnO Berbasis *Annona muricata*

Karakteristik nanopartikel yang diuji adalah ukuran partikel, polidispersitas indeks (PI), dan zeta potensial menggunakan Particle Size Analyzer (PSA).

3.4.1 Ukuran partikel dan indeks polidispersitas

Ukuran partikel dan PI dianalisis berdasarkan metode metode DLS (Dynamic Light Scattering) yang merupakan ukuran hidrodinamik (hydrodynamic diameter). Hasil uji ukuran partikel dan PI ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil uji ukuran partikel dan polidispersitas indeks

Berdasarkan hasil pengukuran, nanopartikel ZnO berbasis ekstrak daun *Annona muricata* menunjukkan nilai Z-Average sebesar 208,4 nm dengan PI sebesar 0,624. Z-Average pada analisis DLS merupakan diameter hidrodinamik rata-rata partikel yang dihitung berdasarkan gerak Brownian partikel dalam medium dispersi. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh melalui DLS tidak secara langsung menggambarkan diameter inti atau ukuran kristalin ZnO, melainkan ukuran hidrodinamik partikel ketika berada dalam medium, yang dapat mencakup partikel tunggal, lapisan molekul yang terhidrasi, dan agregasi beberapa partikel (Al-shehaby et al., 2025). Z-average sensitif terhadap keberadaan sejumlah kecil partikel berukuran besar atau agregat karena intensitas hamburan cahaya meningkat secara kuat dengan ukuran partikel (Raha dan Ahmaruzzaman, 2022).

Polidispersitas indeks merupakan parameter yang menggambarkan lebar distribusi ukuran partikel. Semakin rendah nilai PI menunjukkan distribusi ukuran yang semakin homogen, sedangkan nilai yang semakin tinggi menunjukkan distribusi yang semakin heterogen (Zhang et al., 2024). Apabila nilai PDI 0,5 sampai 0,7 menunjukkan distribusi yang lebar, pada penelitian ini diperoleh nilai PDI 0,624 yang artinya nanopartikel ZnO memiliki distribusi ukuran yang relatif

lebar atau polidispers, yang mengindikasikan adanya heterogenitas ukuran dan kemungkinan keberadaan agregat dalam sistem disperse (Filippov et al., 2023). Hal ini dapat terjadi selama proses *green synthesis* karena ekstrak tanaman mengandung berbagai metabolit sekunder yang dapat berperan sebagai agen pereduksi, penstabil, maupun *capping agent*. Senyawa-senyawa fitokimia tersebut dapat berinteraksi dengan permukaan ZnO dan membantu pembentukan serta stabilisasi nanopartikel, tetapi efektivitas proses *capping* tidak selalu seragam pada seluruh partikel. Perbedaan jumlah molekul penstabil yang berasosiasi dengan permukaan partikel dapat menyebabkan sebagian partikel tetap terdispersi secara individual, sementara sebagian lainnya mengalami interaksi antarmuka dan membentuk agregat (Mahajan et al., 2025).

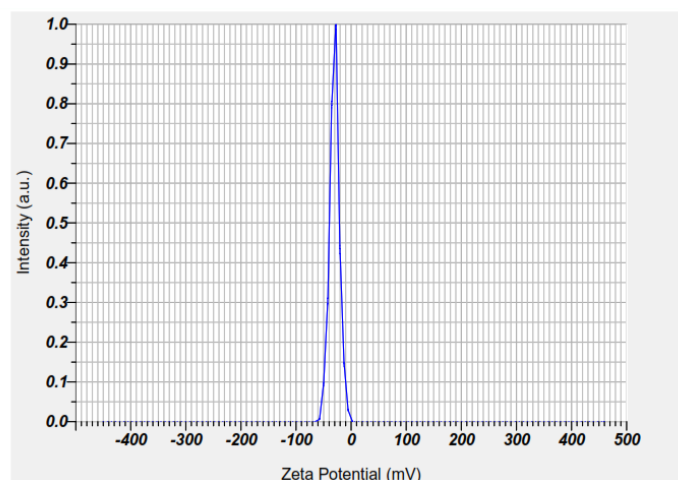
Karakteristik ukuran partikel dan indeks polidispersitas berpotensi memengaruhi aktivitas nanopartikel ZnO berbasis ekstrak *A. muricata* terhadap *S. frugiperda* (Nuryanti et al., 2026). Nilai Z-Average sebesar 208,4 nm menunjukkan ukuran hidrodinamik dalam kisaran nano, yang memungkinkan partikel memiliki luas permukaan relatif besar untuk berinteraksi dengan permukaan tubuh maupun sistem pencernaan serangga (Li et al., 2025). Selain itu, nanopartikel ZnO dapat berperan sebagai pembawa senyawa bioaktif dari ekstrak *A. muricata*, sementara ZnO berpotensi menghasilkan reactive oxygen species (ROS) yang dapat menyebabkan stres oksidatif dan mengganggu fungsi fisiologis serangga (Kadir et al., 2025). Namun, nilai PDI sebesar 0,624 menunjukkan distribusi ukuran yang relatif lebar dan mengindikasikan kemungkinan terbentuknya agregat, sehingga jumlah partikel individual yang tersedia untuk berinteraksi dengan *S. frugiperda* dapat menjadi tidak seragam. Kondisi tersebut berpotensi memengaruhi efektivitas toksik nanopartikel, meskipun aktivitas terhadap *S. frugiperda* tidak hanya ditentukan oleh ukuran dan PDI, tetapi juga oleh konsentrasi, stabilitas dispersi, komposisi senyawa bioaktif ekstrak, serta lama paparan (Noreen et al., 2024). Dengan demikian, karakteristik ukuran 208,4 nm dan PDI 0,624 dapat menjadi salah satu faktor yang mendukung aktivitas biologis nanopartikel ZnO terhadap *S. frugiperda*, tetapi hubungan tersebut perlu dikonfirmasi melalui data mortalitas dan nilai LC₅₀ pada waktu pengamatan yang berbeda.

3.4.2 Zeta potensial

Uji zeta potential digunakan untuk mengetahui muatan permukaan nanopartikel serta memperkirakan kecenderungan stabilitas dispersi koloid. Parameter ini penting karena nanopartikel dengan muatan permukaan yang cukup besar akan mengalami gaya tolak-menolak elektrostatis, sehingga kecenderungan partikel untuk saling mendekat, beragregasi, atau mengalami flokulasi dapat berkurang (Cai et al., 2026).

Hasil uji zeta potensial menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO yang disintesis menggunakan ekstrak *Annona muricata* memiliki nilai zeta potensial rata-rata sebesar -30,1 mV, dengan mobilitas elektroforetik sebesar -0,000232 cm²/V·s (Gambar 3). Nilai negatif menunjukkan bahwa permukaan nanopartikel memiliki karakter muatan elektrokinetik negatif. Zeta potensial merupakan parameter penting untuk mengevaluasi karakteristik permukaan dan kecenderungan stabilitas koloid nanopartikel. Semakin besar nilai absolut zeta potensial, semakin kuat gaya tolak-menolak elektrostatis antarpartikel sehingga kecenderungan agregasi dapat dikondisikan (Kuyukina et al., 2022).

Zeta Potential (Mean) : -30.1 mV
 Electrophoretic Mobility Mean : -0.000232 cm²/Vs



Gambar 3. Hasil uji zeta potensial

Nilai $-30,1$ mV pada penelitian ini berada tepat sedikit di bawah batas -30 mV yang secara umum digunakan sebagai batas praktis untuk membedakan dispersi dengan stabilitas elektrostatis rendah dan tinggi. Beberapa literatur menggunakan ± 30 mV sebagai batas konvensional, dengan nilai absolut >30 mV menunjukkan stabilitas elektrostatis yang lebih baik, sedangkan nilai yang mendekati 0 mV menunjukkan meningkatnya kecenderungan agregasi atau flokulasi. Berdasarkan klasifikasi yang lebih rinci, zeta potensial 0 – ± 10 mV dikategorikan sangat tidak stabil, ± 10 – 20 mV memiliki stabilitas terbatas, ± 20 – 30 mV menunjukkan stabilitas sedang, sedangkan nilai $>\pm 30$ mV dikategorikan sangat stabil (Jazani *et al.*, 2022). Nilai zeta potensial sebesar $-30,1$ mV dapat dikategorikan sebagai stabilitas elektrokinetik yang relatif baik dan berada pada batas awal kategori sangat stabil, meskipun hanya sedikit melampaui nilai ambang tersebut.

Muatan negatif pada permukaan nanopartikel memungkinkan terbentuknya gaya tolak-menolak elektrostatis antarnanopartikel yang bermuatan sejenis. Gaya tersebut dapat mengurangi kemungkinan partikel saling mendekat dan beragregasi akibat gaya tarik van der Waals (Petretto *et al.*, 2022). Oleh karena itu, hasil $-30,1$ mV menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO hasil sintesis memiliki kondisi permukaan yang mendukung pemeliharaan dispersi dan relatif menghambat pembentukan agregat. (Zhang *et al.*, 2024) melaporkan bahwa peningkatan magnitudo zeta potensial meningkatkan gaya tolak-menolak antarpartikel, sehingga sistem dengan nilai zeta potensial yang lebih besar secara absolut cenderung mempunyai ketahanan agregasi yang lebih baik.

Muatan negatif tersebut diduga berkaitan dengan keberadaan senyawa fitokimia ekstrak *A. muricata* yang berinteraksi atau teradsorpsi pada permukaan ZnO selama proses green synthesis. Gugus fungsi dari metabolit sekunder tanaman dapat berkontribusi terhadap karakter permukaan nanopartikel sekaligus berperan sebagai *capping* atau *stabilizing agents* (Dargah *et al.*, 2024). Lapisan biomolekul tersebut berpotensi memberikan stabilisasi tambahan melalui mekanisme sterik, sehingga kestabilan dispersi tidak semata-mata bergantung pada gaya elektrostatis (Pistanty *et al.*, 2025). Nilai zeta potensial dalam penelitian ini sebesar $-30,1$ mV dapat mencerminkan keberhasilan terbentuknya permukaan nanopartikel yang cukup bermuatan dan terlapis oleh komponen biomolekul dari ekstrak tanaman. Kondisi dispersi yang relatif stabil berpotensi mendukung efektivitas nanopartikel terhadap *S. frugiperda* karena meningkatkan

ketersediaan partikel individual untuk berinteraksi dengan permukaan tubuh maupun saluran pencernaan serangga (Oliveira et al., 2026). Selain itu, muatan permukaan negatif dan keberadaan senyawa fitokimia yang berperan sebagai *capping agent* dapat mempertahankan karakteristik permukaan nanopartikel sekaligus memungkinkan senyawa bioaktif dari ekstrak *A. muricata* tetap berasosiasi dengan partikel. Ketika nanopartikel terpapar pada *S. frugiperda*, ZnO berpotensi berkontribusi terhadap aktivitas toksik melalui pembentukan reactive oxygen species (ROS), sedangkan senyawa bioaktif *A. muricata* dapat memberikan efek biologis tambahan yang berpotensi mengganggu proses fisiologis serangga (Yaqoob et al., 2025). Dengan demikian, nilai zeta potensial $-30,1$ mV dapat mendukung kestabilan dispersi dan mempertahankan ketersediaan nanopartikel untuk kontak dengan *S. frugiperda*,

4. KESIMPULAN

Kesimpulan pada penelitian ini yaitu nanopartikel ZnO hasil *green synthesis* menggunakan ekstrak daun *Annona muricata* menunjukkan bioaktivitas terhadap larva *Spodoptera frugiperda* instar III melalui efek toksisitas kontak, aktivitas *antifeedant*, dan repelen. Toksisitas nanopartikel ZnO bersifat *time-dependent*, ditunjukkan oleh penurunan nilai LC_{50} dari 1721,60 ppm pada 24 JSP menjadi 1064,28 ppm pada 72 JSP. Aktivitas *antifeedant* paling kuat dicapai pada konsentrasi 1600 ppm sebesar 84,83% pada 24 JSP, sedangkan aktivitas repelen pada konsentrasi 1600 ppm setelah 24 jam pengamatan mencapai 60,00%. Karakterisasi fisik menggunakan PSA menunjukkan nanopartikel ZnO memiliki nilai Z-Average sebesar 208,4 nm, Polydispersity Index (PI) sebesar 0,624, serta nilai potensial zeta sebesar $-30,1$ mV yang menandakan stabilitas elektrostatis koloid yang baik.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula Tahun Anggaran 2026 dengan Nomor: 192/C3/DT.05.00/PL-BARU/2026 dan Nomor Kontrak 116/DST/PL15.8/PP/2026. Terima kasih juga disampaikan kepada Politeknik Negeri Lampung atas penyediaan fasilitas Laboratorium serta dukungan sarana dan prasarana selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terimakasih kepada seluruh pihak dan tim teknis laboratorium yang telah membantu serta berkontribusi dalam kelancaran proses penelitian hingga penyusunan naskah ilmiah ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Abdelbaky, A. S., Mohamed, A. M. H. A., Sharaky, M., Mohamed, N. A., & Diab, Y. M. (2023). Green approach for the synthesis of ZnO nanoparticles using *Cymbopogon citratus* aqueous leaf extract: characterization and evaluation of their biological activities. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00432-5>
- Afifah, L., & Widiyaningrum, P. (2022). Analisis mortalitas dan kemampuan makan kutu kandang *Alphitobius diaperinus* akibat terpapar ekstrak biji mahoni. *Seminar Nasional Biologi X*, 260–269.
- Ainun, A. D. A., Sjam, S., Sulaeha, S., & Fitriyanti, N. A. (2025). Evaluating the repellent efficacy of a *Vitex trifolia* L. leaf powder botanical formulation against oriental fruit flies (*Bactrocera dorsalis*). *HAYATI Journal of Biosciences*, 32(5), 1251–1259. <https://doi.org/10.4308/hjb.32.5.1251-1259>

- Al-shehaby, N., Elshoky, H. A., Zidan, M., Salaheldin, T. A., Gaber, M. H., Ali, M. A., & El-sayed, N. M. (2025). In vitro localization of modified zinc oxide nanoparticles showing selective anticancer effects against colorectal carcinoma using biophysical techniques. *Scientific Reports*, 15(16811), 1–23.
- Ardiansyah, S., & Nuryanti, N. S. P. (2025). Toksisitas nanoemulsi ekstrak biji *Annona muricata* DAN *Leucaena leucocephala* dengan metode fase inversi dan homogenisasi terhadap hama *Spodoptera frugiperda*. *Agrotropika*, 24(2), 409–419. <https://doi.org/http://doi.org/10.23960/ja.v24i2.11573>
- Ardiansyah, S., Nuryanti, N. S. P., & Wahyudi, A. (2024). Toksisitas ekstrak campuran biji jarak pagar dan serai wangi terhadap *Callosobruchus chinensis*. *Jurnal Agrotek Tropika*, 12(3), 400–408. <https://doi.org/10.23960/jat.v12i3.6840>
- Bekele, B., Degefa, A., Tesgera, F., Jule, L. T., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., Nagaprasad, N., & Ramasamy, K. (2021). Green versus Chemical Precipitation Methods of Preparing Zinc Oxide Nanoparticles and Investigation of Antimicrobial Properties. *Nanomaterials*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9210817>
- Cai, Y., Chen, M., Han, P., Peng, L., Luo, K., & Qiu, J. (2026). Visualized measurement of nanoparticle Zeta potential via image cross-correlation and axial velocity compensation. *Measurement Science and Technology*, 37(22), 225301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae6c51>
- Dargah, M. M., Pedram, P., Cabrera-Barjas, G., Delattre, C., Nesic, A., Santagata, G., Cerruti, P., & Moeini, A. (2024). Biomimetic synthesis of nanoparticles: A comprehensive review on green synthesis of nanoparticles with a focus on *Prosopis farcta* plant extracts and biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 332, 103277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103277>
- Dube, E. (2026). From plant metabolites to functional nanomaterials: Advances in phytochemical-mediated silver nanoparticle synthesis and applications. *Micro*, 6(40), 1–40.
- Durán-ruiz, C. A., González-Esquinca, A. R., & De-la-Cruz-Chacón, I. (2024). Annonaceous acetogenins : A comparative analysis of insecticidal activity Acetogeninas de Anonáceas : uma análise comparativa de sua atividade inseticida. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 46(508), 1–19.
- Filippov, S. K., Khusnutdinov, R., Murmiliuk, A., Inam, W., Zakharova, L. Y., Zhang, H., & Khutoryanskiy, V. V. (2023). Materials Horizons Dynamic light scattering and transmission electron microscopy in drug delivery: a roadmap for correct characterization of nanoparticles and interpretation of results. *Materials Horizons*, 10, 5354–5370. <https://doi.org/10.1039/D3MH00717K>
- Gaire, S., Sierras, A., Morgan, H. L., & DeVries, Z. C. (2024). Behavioral responses of field-collected German cockroaches to pyrethroids and pyrethroid-formulated insecticides. *Pest Management Science*, 80(2), 433–441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ps.7774>
- Gajger, I. T., & Dar, S. A. (2021). Plant allelochemicals as sources of insecticides. *Insects*, 12(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/insects12030189>
- González-lópez, A. M., Quiñones-aguilar, E. E., Enríquez-vara, J. N., Martínez-ibarra, J. A., & Rincón-enríquez, G. (2025). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Enhance the Insecticidal Activity of *Annona muricata* L. Leaves. *Plants*, 14(3501), 1–16.
- Hatab, M. H., Badran, A. M. M., Elaroussi, M. A., Rashad, E., Abu, A. M., & Elokil, A. A. (2024). Effect of zinc oxide nanoparticles as feed additive on blood indices, physiological, immunological responses, and histological changes in broiler chicks. *Biological Trace Element Research*, 202(5), 2279–2293. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03820-y>

- Jazani, R. S., Sipos, B., & Haspel, H. (2022). Quality by Design-Driven Zeta Potential Optimisation Study of Liposomes with Charge Imparting Membrane Additives. *Pharmaceutics*, 14(1798), 1–25.
- Jeon, H., & Hyung, J. (2025). Gustatory habituation to essential oil induces reduced feeding deterrence and neuronal desensitization in *Spodoptera litura*. *Journal of Pest Science*, 98(1), 321–336. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01794-x>
- Jia, Z., Yang, C., Liu, Y., Yang, Y., Zhou, R., Cheng, Z., Geng, S., & Xu, Y. (2026). Short-term feeding disruption effects and efficacy of six biopesticides against *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae). *Biology*, 15(419), 1–18.
- Kadir, M. L., Dageri, A., & Aslan, T. N. (2025). Nanopesticides for managing primary and secondary stored product pests: Current status and future directions. *Heliyon*, 11(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42341>
- Koerich, L. B., Serravite, A. M., Castro, P. H. De, Rabelo, J. P., Andrade, P. H., Marques, D. M., Pereira, M. H., Roberto, M., Sant, V., Gontijo, N. F., Maria, J., Bezerra, T., Caldas, G., & Pessoa, D. Á. (2025). Repellent effects of insecticides against *Aedes aegypti*: a systematic review. *Parasites & Vectors*, 18(504), 1–18.
- Kumar, R., Kaur, R., Ranout, A. S., & Nadda, G. (2025). A review on novel formulations and delivery systems of botanical insecticides for enhanced efficacy. *Neotropical Entomology*, 54(1), 81. <https://doi.org/10.1007/s13744-025-01290-6>
- Kuyukina, M. S., Makarova, M. V., Pistsova, O. N., Glebov, G. G., Osipenko, M. A., & Ivshina, I. B. (2022). Heliyon Exposure to metal nanoparticles changes zeta potentials of *Rhodococcus* cells. *Heliyon*, 8(11), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11632>
- Li, X., Wang, X., Sun, C., Wang, A., An, C., Li, N., Shen, Y., Hu, J., Liu, H., Xie, J., Luo, D., & Wang, Y. (2025). A unimolecule nanopesticide delivery system applied in field scale for enhanced pest control. *Nature Communications*, 16, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-025-61969-7>
- Li, Y., Yao, S., Feng, D., Haack, R. A., Yang, Y., Hou, J., & Ye, H. (2023). dispersal behavior characters of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Insects*, 14(488), 1–11.
- Li, Z., Yan, W., Li, Y., Xiao, Y., Shi, Y., Zhang, X., Lei, J., Min, K., Pan, Y., Chen, X., Liu, Q., & Jiang, G. (2023). Particle Size Determines the Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles in Rice (*Oryza sativa* L.) Revealed by Spatial Imaging Techniques. *Environmental Science & Technology*, 57(36), 13356–13365. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03821>
- Mahajan, M., Kumar, S., Gaur, J., Kaushal, S., Dalal, J., Singh, G., Misra, M., & Ahlawat, D. S. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles using *Justicia adhatoda* for photocatalytic degradation of malachite green and reduction of 4-nitrophenol. *RSC Advances*, 15(4), 2958–2980. <https://doi.org/10.1039/d4ra08632e>
- Mavridis, K., Evangelou, V., Grigoriadou, A. M., Papachristos, D. P., & Vontasa, J. (2025). Molecular surveillance of resistance mutations in invasive populations of *Spodoptera frugiperda* in Europe, for evidence-based pest control. *Pest Management Science*, 81, 4821–4830. <https://doi.org/10.1002/ps.8849>
- Noreen, A., Hussain, M., Malik, M. F., Iftikhar, A., Zeb, U., Farid, A., Alarfaj, A. A., & Ansari, M. J. (2024). *Moringa oleifera* based silver nanoparticles: Synthesis and insecticidal toxicity against fall armyworm. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(4), 1–17. <https://doi.org/10.15835/nbha52414066>
- Nuryanti, N. S. P., Maulida, D., Ardiansyah, S., Pratiwi, N., & Dulbari. (2026). Characterization and bioactivity of nanoemulsions from *Leucaena leucocephala* and *Annona muricata* extracts against *Spodoptera frugiperda*. *J. Trop. Plant Pests Dis*, 26(1), 90–100. <https://doi.org/10.23960/j.hptt.12690-100>

- Oliveira, J. A. C., Figueiredo, K. G., Fernandes, L. A., Carvalho, V. C., Alves, D. S., Ugucioni, J. C., Oliveira, J. L., Carvalho, H. W. P., Bertolucci, S. K. V., & Carvalho, G. A. (2026). Toxicity of Nanoemulsified *Eugenia uniflora* (Myrtaceae) Essential Oil to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and Selectivity to *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *Plants*, 15(248), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants15020248>
- Overton, K., Maino, J. L., Day, R., Umina, P. A., Bett, B., Carnovale, D., Ekesi, S., Meagher, R., & Reynolds, O. L. (2021). Global crop impacts, yield losses and action thresholds for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*): A review. *Crop Protection*, 145, 105641. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105641>
- Pavana, J. K., Deshmukh, S. S., Mallikarjuna, H. B., Kalleshwaraswamy, C. M., Naik, T. B., & Mota-sanchez, D. (2023). Sublethal effects of botanicals on the growth and development of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Current Science*, 125(1), 75–80.
- Petretto, E., Ong, Q. K., Olgiati, F., Mao, T., Campomanes, P., & Vanni, S. (2022). Monovalent ion-mediated charge–charge interactions drive aggregation of surface-functionalized gold nanoparticles. *Nanoscale*, 14(October), 15181–15192. <https://doi.org/10.1039/d2nr02824g>
- Pistanty, M. A., Astirin, O. P., & Marliyana, S. D. (2025). Green-synthesized gold nanoparticles from *Centella asiatica* for colloidal stability and UV protection. *Journal of Cultural Analysis and Social Change*, 10(4), 3994–4012.
- Pittarate, S., Rajula, J., Rahman, A., Vivekanandhan, P., Mekchay, S., & Krutmuang, P. (2021). Insecticidal Effect of Zinc Oxide Nanoparticles against *Spodoptera frugiperda* under Laboratory Conditions. *Insects*, 1017(12), 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/insects12111017>
- Raha, S., & Ahmaruzzaman, M. (2022). Nanoscale Advances applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances*, 4(March), 1868–1925. <https://doi.org/10.1039/D1NA00880C>
- Ramadhan, R. A. M., & Firmansyah, E. (2023). Bioaktivitas ekstrak *Annona muricata*, *Chromolaena odorata*, dan *Tinospora cordifolia* terhadap larva *Spodoptera frugiperda*. *Jurnal Agroekoteknologi*, 16(1), 22–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.21107/agrovigor.v16i1.10668>
- Rehman, A. U., Nisar, A., Iftikhar, R., Recycling, W., Recovery, R., Hassan, M. S., Saeed, B., Punjab, S., Punjab, S., Fatima, M., Ullah, S. W., Hassan, W. U., Mahmood, W., & Info, A. (2025). *Synthesis of zno nanoparticles using Aloe vera green source and their antibacterial properties*. 3(3), 37–48.
- Ren, L., & Chong, J. H. (2023). Repellency and toxicity of eight plant extracts against the western flower thrips, *frankliniella occidentalis*. *Applied Sciences*, 13(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app13031608>
- Ruiz-aguilar, M. Y., Aguirre-uribe, L. A., Noemí, S., Pérez-luna, Y. C., Ángel, E. C., Juárez, A. H., Yesenia, M., Aguirre-uribe, L. A., Noemí, S., Pérez-luna, Y. C., & Ángel, E. C. (2025). Insecticidal efficacy of zinc oxide and silicon dioxide nanoparticles against larvae of *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith (Lepidoptera: Nocuidae). *Journal of Experimental Nanoscience*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/17458080.2025.2466532>
- Sharma, S., Upadhyaya, S., & Tiwari, S. (2022). Biology and integrated management of tobacco caterpillar, *Spodoptera litura* Fab.: A systematic review. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 3(1), 28–39. <https://doi.org/10.11594/jaab.03.01.04>
- Stupp, P., Rakes, M., Martins, L. N., Piovesan, B., da Costa Oliveira, D., Contreras-Miranda, J. A., do Prado Ribeiro, L., Nava, D. E., & Bernardi, D. (2020). Lethal and Sublethal Toxicities of Acetogenin-Based Bioinsecticides on *Ceratitis Capitata* and the Parasitoid

- Diachasmimorpha Longicaudata. *Phytoparasitica*, 48(3), 477–489. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00801-y>
- Supartha, I. W., Susila, I. W., Sunari, A. A. A. S., Mahaputra, I. G. F., Yudha, I. K. W., & Wiradana, P. A. (2021). *Damage characteristics and distribution patterns of invasive pest, Spodoptera frugiperda (J. E Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on maize crop in Bali, Indonesia*. 22(6), 3378–3387. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d2206xx>
- Yaqoob, R., Pervez, I., & Adnan, M. (2025). Effect of zinc oxide nanoparticles synthesized from Ocimum basilicum (basil) leaves extract on sugarcane pests Rabia Yaqoob Article Information : Journal of Biological Sciences and Public Health, 3, 7–14.
- Zelaya-molina, L. X., Chávez-Díaz, I. F., Santos-Villalobos, S. de los, Cruz-Cárdenas, C. I., Ruíz-Ramírez, S., & Rojas-Anaya, E. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 27, 69–79.
- Zhang, W., Zhang, L., & Gao, J. (2024). Yield stress and zeta potential-pH behaviour of washed spherical α -Al₂O₃ particles with anionic additives: Particle force and ChemBio 3D simulation. *Heliyon*, 10(19), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38280>
- Zhang, X., Luo, Q., Zhang, F., Zhao, X., Li, Y., Yang, N., & Feng, L. (2024). Preparation of PLA Nanoparticles and Study of Their Influencing Factors. *Molecules*, 29(5566), 1–15.